

# **Eignungsuntersuchung eines Netzwerkanalysators zur Widerstandsbestimmung von Gesteinen**

Jörn Schünemann<sup>1</sup>, Andreas Weller<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Clausthal, Institut für Geophysik (jetzt GGA-Institut  
Hannover)

<sup>2</sup> Technische Universität Clausthal, Institut für Geophysik

**Stichworte:** vektorieller Netzwerkanalysator, spezifischer elektrischer Widerstand, petrophysikalische Eigenschaften, SIP-Fuchs, DEMS

## **Einführung**

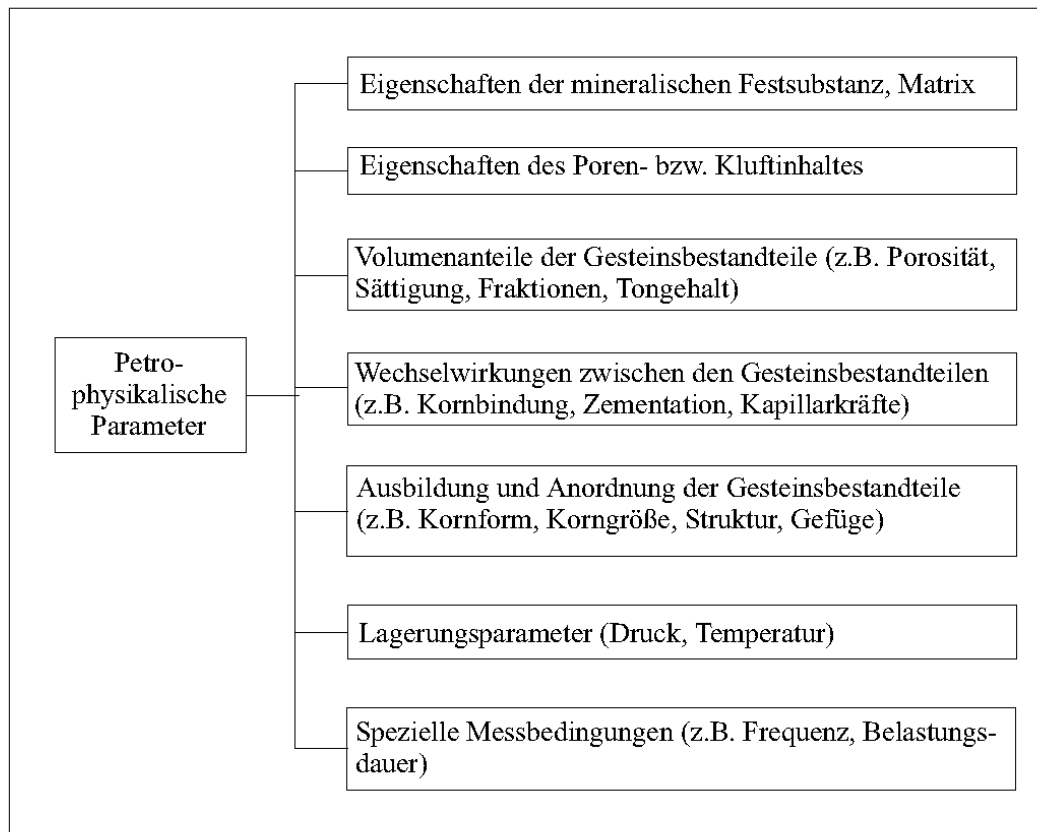
Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde untersucht, ob ein vektorieller Netzwerkanalysator zur Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes von Gesteinen geeignet ist.

Vorteilhaft bei der Arbeit mit Gesteinen ist das Wissen um die unterschiedlichen Arten, deren Einteilung und Aufbau. Ein Gestein ist nach [2] ein in sich wesensgleicher Teil der Erdkruste, ein Gemenge von Mineralen oder auch nur einer Mineralart.

Unter physikalischen Gesichtspunkten erfolgt eine Einteilung nach dem Hauptbestandteil in monomineralische und polymineralische Gesteine, nach dem Anteil und der räumlichen Ausbildung der festen Bestandteile in dichte, poröse und klüftige Gesteine und nach Art und Grad der Bindung der Partikel poröser Sedimente in verfestigte und unverfestigte Gesteine. Die physikalischen Eigenschaften der Gesteine werden, entsprechend [3], entscheidend durch die oben genannten Merkmale geprägt. Hier lässt sich eine Einteilung in Magmatite (Tiefen- und Ergussgesteine), Sedimentite (klastisch, chemogen oder organogen) und Metamorphite (Umwandlungsgesteine) vornehmen.

Gesteine sind in der Regel Mineralgemische und deshalb sind ihre Eigenschaften abhängig von den Anteilen und spezifischen Eigenschaften der Bestandteile. Bei gasförmigen oder flüssigen Bestandteilen ist der Einfluss von Poren nicht zu vernachlässigen. Insgesamt können die folgenden Faktoren als einflussnehmend auf die petrophysikalischen Parameter angesehen werden: die Eigenschaften der

mineralischen Festsubstanz, die Eigenschaften des Poren- bzw. Kluftinhaltes, die Volumenanteile der Gesteinsbestandteile, Wechselwirkungen zwischen den Gesteinsbestandteilen, die Ausbildung und Anordnung der Gesteinsbestandteile. Hinzu kommen noch Lagerungsparameter wie Druck und Temperatur, sowie spezielle Messbedingungen (z.B. Frequenz, Belastungsdauer).



**Abb 1:** Einflussfaktoren auf petrophysikalische Parameter (nach [3])

Gesteinsbildende Minerale wie zum Beispiel Quarz oder Glimmer sind schlechte elektrische Leiter und weisen hohe spezifische elektrische Widerstände von  $10^7 \Omega\text{m}$  auf. Erzminerale und gediegene Metalle wie Graphit sind gute Leiter und haben niedrige Widerstände ([3]). Inhalte von Poren oder Klüften sind, solange es sich bei diesen um Luft oder Gas handelt, welches nicht mit Wasserdampf angereichert ist, nicht leitend. Sollten keine festen, leitfähigen Gesteinsbestandteile vorhanden sein, wird die Leitfähigkeit von den in den Poren befindlichen wässrigen Lösungen bestimmt. Die Leitfähigkeit ist dabei abhängig von der Art, Konzentration und der Temperatur des Elektrolyten. Folglich treten gute Leitfähigkeiten nur bei Gesteinen auf, die gutleitende Akzessorien aufweisen und deren Poren und Klüfte mit

gutleitenden Elektrolyten gefüllt sind. Schwankungen in der Porenfüllung und in den Volumina der einzelnen Gesteinsbestandteile können zu unterschiedlichen Leitfähigkeiten führen. Neben erhöhten Anteilen von gutleitenden Akzessorien ist für eine gute Leitfähigkeit auch die gute Vernetzung der leitenden Bestandteile wichtig. Um die elektrischen Eigenschaften von Gesteinen zu charakterisieren, werden vor allem der spezifische elektrische Widerstand und die Dielektrizitätskonstante verwendet. Die elektrische Leitfähigkeit und die Dielektrizitätskonstante bestimmen mit einer elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$  eine Stromdichte  $\vec{j}$  bzw. eine Verschiebungsdichte  $\vec{D}$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

Das Reziproke der Leitfähigkeit  $\sigma$  ergibt den spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho$ . Die Einheit ist das  $\Omega m$ . Wird der Realteil des gemessenen komplexen elektrischen Widerstandes mit einem Konfigurationsfaktor, der die Abmessungen der Gesteinsprobe enthält, multipliziert, ergibt sich für den spezifischen elektrischen Widerstand

$$\rho = R \cdot K$$

mit  $K = A/l$  als Geometriefaktor. Es folgt

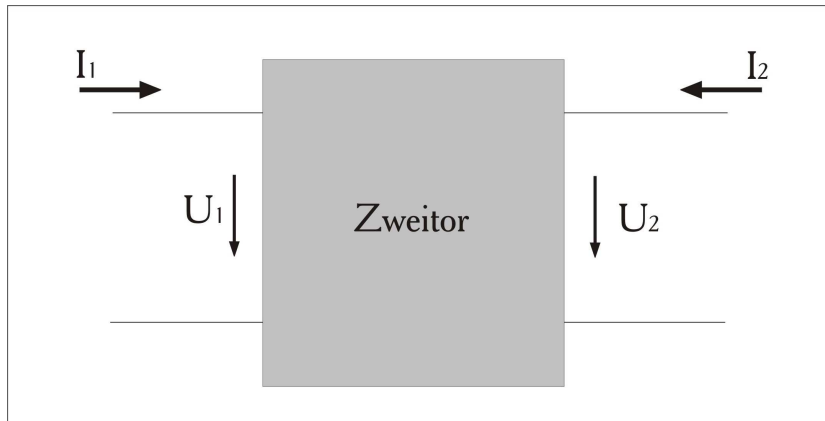
$$\rho = \frac{R \cdot A}{l}$$

mit  $A$  als Fläche der Probe in  $m^2$  und  $l$  als Länge der Probe in  $m$ . Die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  ist das Produkt aus elektrischer Feldkonstante  $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} As/Vm$  und der materialabhängigen relativen Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r.$$

Bei dem hier verwendeten Messgerät handelt es sich um einen vektoriellen Netzwerkanalysator der Firma Rohde & Schwarz vom Typ ZVRE.

Netzwerkanalysatoren gehören zur Grundausrüstung von HF Labors und werden häufig zur Streuparameteranalyse eingesetzt. Zur formalen Beschreibung der Eigenschaften von Übertragungssystemen werden so genannte Zweitore verwendet.



**Abb 2:** *Zweitor mit symmetrischer Wahl der Richtung von Strom und Spannung*

Durch diesen Begriff werden Baugruppen oder Netzwerke zu einem Objekt mit einem Eingang und einem Ausgang zusammengefasst. Zweitore werden für die mathematische Simulation ihrer Wirkung in Netzwerken durch ihre Kenngrößen beschrieben. Die Ermittlung dieser Kenngrößen wird als Netzwerkanalyse bezeichnet. Solche Parameter sind beispielsweise reelle oder komplexe Widerstände.

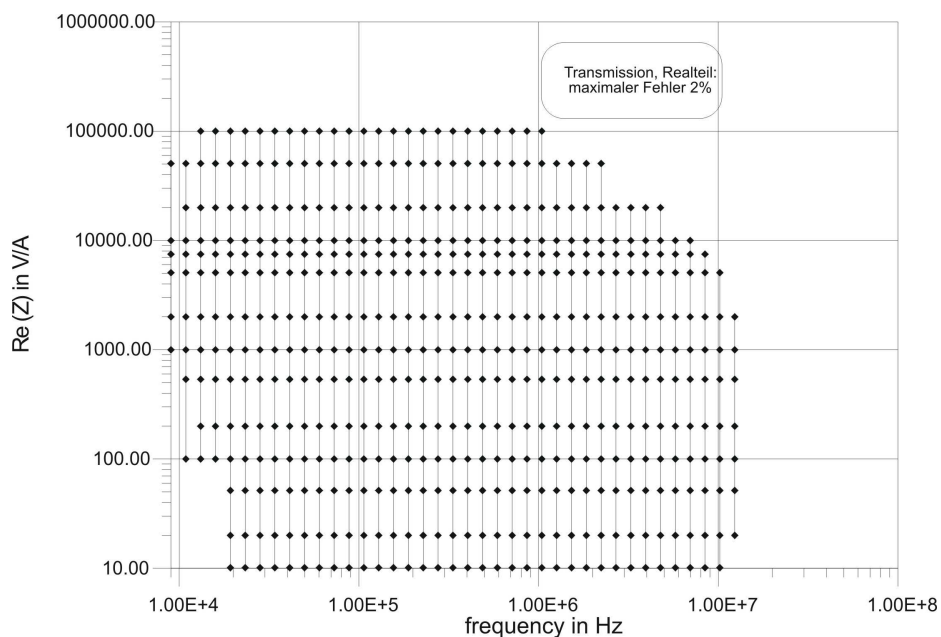
Es gibt zwei Arten von Netzwerkanalysatoren. Bei der skalaren Netzwerkanalyse werden nur die Beträge der Streuparameter gemessen. Wird aber auch die Phase der Streuparameter bestimmt, spricht man von einer vektoriellen Netzwerkanalyse. Das Messsystem besteht aus einer Signalquelle, Elementen zur Signaltrennung, einer Auswerteeinheit, einer Anzeigeeinheit und Geräteanschlüssen. Als Signalquelle dient in der Regel ein Synthesizer, der über einen großen Frequenzbereich ein Signal erzeugt. Der Frequenzbereich, der mit diesem Gerät überdeckt werden kann, reicht von 9 kHz bis 4 GHz. Durch eine zusätzliche, in das Gerät eingebaute Option für externe Messungen kann durch Umgehung der geräteinternen Messbrücken ein direkter Zugriff auf den Generatorausgang und die beiden Empfängereingänge erfolgen und dadurch Ausgangspegel und Empfindlichkeit gesteigert werden. Dies ermöglicht Messungen zwischen 10 Hz und bis 4 GHz.

Streuparameter beschreiben die Eigenschaften von Zweitoren, die eine Zusammenfassung verschiedener Baugruppen zu einem Objekt mit einem Eingang und einem Ausgang darstellen. Man unterscheidet verschiedene Arten von Zweitoren. Eine Charakterisierung kann z.B. durch Kenngrößen von Spannungen und Strömen erfolgen. Bei einer allgemeinen Betrachtung eines linearen Zweitores sind für die Beschreibung der Eingangs- bzw. Ausgangskenngrößen die Richtungen der Ströme und Spannungen festzulegen. Einen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgang erhält man über die Parameter des Zweitores, die beispielsweise reelle oder komplexe Widerstände sind. Jedes unbekannte Netzwerk mit einem Eingang und einem Ausgang lässt sich als Zweitor beschreiben und es ist von seinen Eingangs- und Ausgangsklemmen her charakterisierbar, ohne seinen inneren Aufbau zu kennen ([14]).

Bei höheren Frequenzen treten Probleme auf, da Ströme und Spannungen dann nicht mehr eindeutig an den Klemmen messbar sind. Deshalb wird von der Strom - Spannungsdarstellung zur Wellendarstellung übergegangen. Deren Beschreibung erfolgt durch die Streuparameter. Die Streuparameter sind dimensionslos und komplex. Ströme und Spannungen werden durch normierte Wellen ersetzt, die in das Zweitor hinein und wieder hinaus laufen. Hineinlaufende Wellen werden mit  $a$ , herauslaufende Wellen mit  $b$  bezeichnet. Indizes bezeichnen den Eingang bzw. den Ausgang.

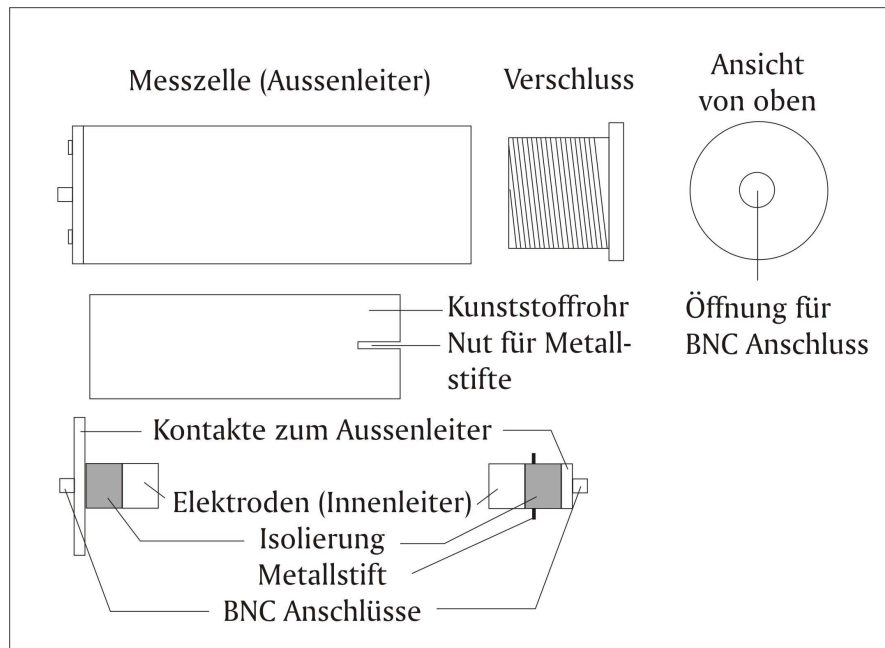
## **Messungen**

Um eine gewisse Routine im Umgang mit dem Messgerät zu erhalten und zu testen, wie genau das Gerät misst, wurden Testmessungen durchgeführt. Zudem sollte später bei unbekannten Gesteinsproben der spezifische Widerstand möglichst genau bestimmt werden und deshalb ist eine vorherige Kenntnis der auftretenden Fehler von Vorteil. Gemessen wurde über verschiedene Frequenzbereiche und in verschiedenen Moden. Es wurden Metallschichtwiderstände unterschiedlicher Größe in eine einfache Halterung eingelötet und der Widerstand mit Hilfe des Netzwerkanalysators gemessen. Es konnten Fehler zwischen 1-2% im Bereich zwischen 9 kHz und 1 MHz für Widerstände kleiner als 50 k $\Omega$  bestimmt werden. Zur Untersuchung der Gesteinsproben wurde eine spezielle Messzelle konstruiert und gebaut. Auch in diese wurden die Widerstände eingelötet um einen eventuellen Einfluss der Messzelle auf die Messungen auszuschließen.



**Abb 3:** Fehlerverteilung nach Testmessungen mit der Messzelle – Schwarze Punkte kennzeichnen die zu den Frequenzen gehörenden Widerstände mit Fehlern von maximal 2 %. Bei fehlenden Punkten sind die Fehler größer als 2 %.

Für die Messungen mit der Messzelle wurden verschiedene natürliche Gesteinsproben wie Kalkstein, Sandstein und Porphyr, aber auch künstlich hergestellter Ziegelstein mit spezifischen elektrischen Widerständen zwischen  $60 \, \Omega\text{m}$  und  $50000 \, \Omega\text{m}$  verwendet, um einen breiten Widerstandsbereich zu überdecken. Die Proben wurden voll mit Leitungswasser aufgesättigt und dann zwischen zwei Filterpapierblättchen in die Zelle eingebaut. Das Filterpapier war mit Silberleittack besprüht und ebenfalls voll gesättigt. Das Papier wird durch die Elektroden in die Poren der Stirnseite der Probe gedrückt und verbessert so die Ankopplung. Es fanden Tests ohne Filterpapier und mit ein- oder zweiseitig eingelegtem Papier statt. Es ergab sich, dass der Vorteil auf Seiten des doppelt angebrachten Filterpapiers in Form eines verringerten Übergangswiderstandes lag.



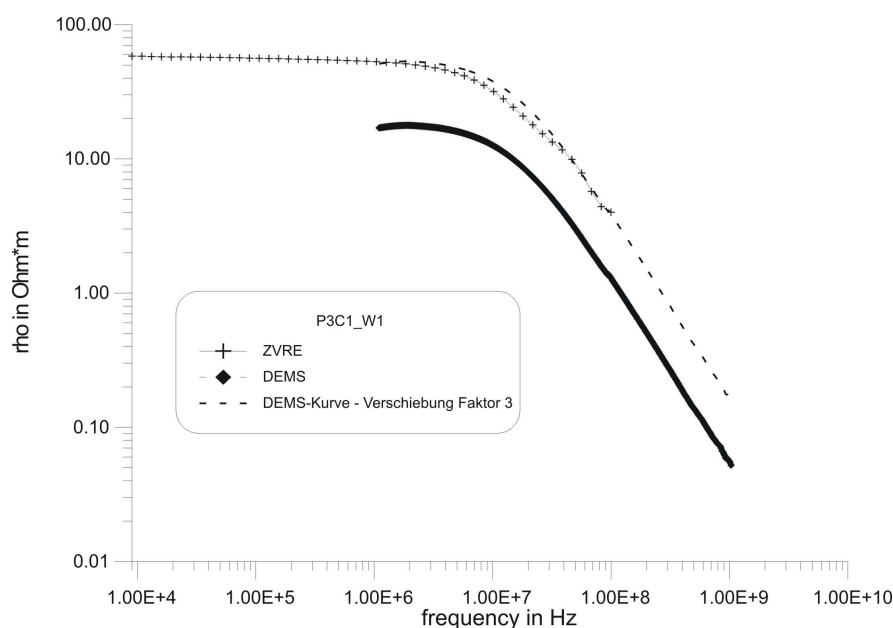
**Abb 4:** Messzelle für Gesteinsproben bis 20 mm Durchmesser

Zusätzlich wurden Zeitreihenmessungen durchgeführt. Zu unterschiedlichen Zeiten nach Beginn der Messungen wurde der jeweilige Widerstand für die Probe bestimmt. Es sollte ermittelt werden, inwieweit eine Zeitabhängigkeit bei der Messung auftritt. Der Grund für die vermutete Zeitabhängigkeit lag darin begründet, dass bei einem Versuchsaufbau Verdunstungserscheinungen beobachtet wurden. Sollte also das Elektrolyt aus den Poren verdunsten, hätte dies Auswirkungen auf die Leitfähigkeit des Gesteins und damit auf den spezifischen elektrischen Widerstand. Bei einer geringeren Menge an Flüssigkeit in den Porenräumen würde sich der Widerstand des Gesteins erhöhen. Ein weiterer Effekt ist die lange Lagerung der Probe in der Zelle in einer Position. Hierbei bewegt sich das Wasser in den Poren durch die Schwerkraft nach unten und sammelt sich dort. Es bildet sich im unteren Bereich der Probe eine Zone besserer Leitfähigkeit aus. Als Folge fließt der Strom nicht mehr durch die Probe sondern nur noch durch den gut leitenden Bereich. Das Ergebnis wäre ein verfälschter spezifischer Widerstand.

Während der Arbeit wurden auch Vergleiche mit anderen Apparaturen durchgeführt. Auf Grundlage vorangegangener Messungen mit der SIP-Fuchs Apparatur wurden die Gesteinsproben für die Messungen mit dem Netzwerkanalysator ausgewählt. Die SIP-Fuchs ([6]) besteht aus einem Messrechner, einer „Base Unit“ und zwei „Remote Units“. Gespeist wird der Aufbau von 2 12 Volt Bleibatterien, um Störeinflüsse aus

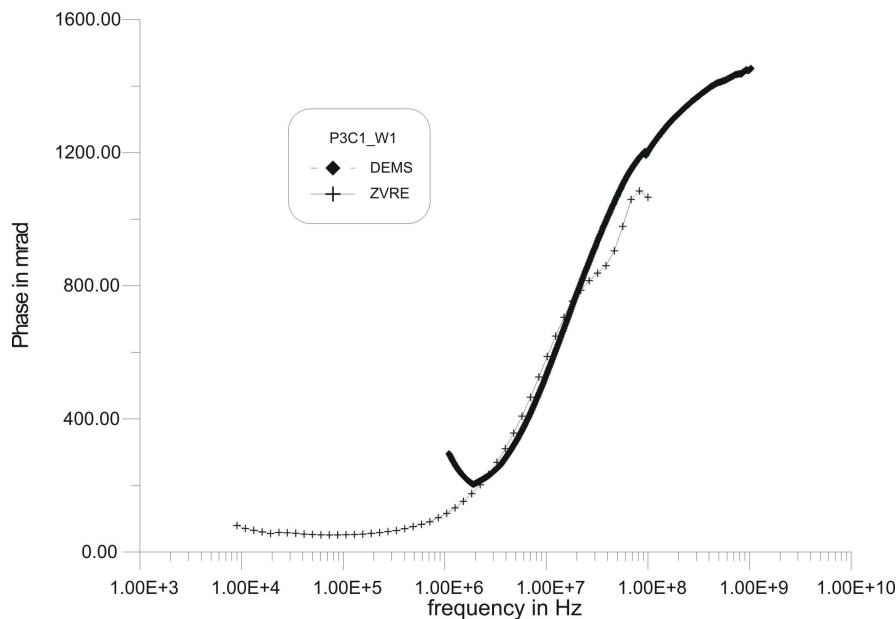
dem 50 Hz Stromnetz zu unterbinden. Die „Base Unit“ ist mit dem Messrechner verbunden und dient der Steuerung des Versuchs. Bei den „Remote Units“ gibt es zwei Arten. Eine dient der Strommessung und die zweite dient der Spannungsmessung. Hier wird die Spannung gemessen, die über der Messzelle abfällt. Die SIP-Fuchs Apparatur kann in einem Frequenzbereich von 1,43 mHz bis 12 kHz messen und der Frequenzbereich des Netzwerkanalysators schließt an den Bereich der SIP-Fuchs Anlage an. Bei einigen Proben können die Messungen mit der SIP-Fuchs begonnen und mit dem Netzwerkanalysator fortgesetzt werden, weil beide Gerätschaften im sich überschneidenden Frequenzbereich ähnliche Ergebnisse zeigen. Der maximale spezifische elektrische Widerstand beträgt 900  $\Omega\text{m}$ . Bei höheren Widerständen treten Fehler auf, die außerhalb vorher definierter Fehlergrenzen liegen und als zu groß betrachtet werden.

Ein zweites Vergleichsgerät wurde mit dem Dielektrischen Messsystem von Hewlett Packard verwendet. Es besteht aus einer Messzelle und einer darin eingebetteten Messkapsel ([7]). Hierin befinden sich verstellbare Elektrodenplatten, um auch Proben mit fehlender Planparallelität berücksichtigen zu können. Ein Netzwerkanalysator erzeugt ein Signal, dass geteilt und über einer Referenz- und einen Probenarm geschickt wird. Ermittelt und verglichen wurde das Spannungsverhältnis an Referenz und Probenarm nach Betrag und Phase ([8]). Der Netzwerkanalysator erzeugt Frequenzen zwischen 300 kHz und 1,3 GHz. Die Probe ist bedingt durch die Abmessungen der Zelle nur maximal auf eine Höhe von 4,5 mm und einen Durchmesser von 13 mm beschränkt. Im Frequenzbereich schließt das Gerät also im oberen Bereich des getesteten Netzwerkanalysators an.





**Abb 5:** Vergleich für den spezifischen elektrischen Widerstand von Messungen mit dem Dielektrischem Messsystem und dem Netzwerkanalysator. Für einen besseren Vergleich wurde die DEMS Kurve mit dem Faktor drei multipliziert und nach oben verschoben.



**Abb 6:** Vergleich der Phasen von Dielektrischem Messsystem und Netzwerkanalysator. Die Kurven überdecken sich in einem Frequenzbereich von  $2 \cdot 10^6$  Hz und  $2 \cdot 10^7$  Hz.

Auf Grund der abweichenden Probenform wurde mit dem DEMS und dem Netzwerkanalysator nur eine Probe vermessen. Es hat sich gezeigt, dass im Überdeckungsbereich der Frequenz bei beiden Geräten ein ähnlicher Kurvenverlauf zu beobachten war. Damit wäre eine Ausdehnung der Bestimmung der Dielektrizitätszahl zu niedrigeren Frequenzen hin denkbar.

Zusammenfassend können folgende Feststellungen gemacht werden: Mit dem Netzwerkanalysator können bisher spezifische elektrische Widerstände von Gesteinsproben bestimmt werden, wenn sie  $900 \, \Omega\text{m}$  nicht überschreiten. Messungen mit Filterpapier zeigten, dass hiermit der Übergangswiderstand zwischen Elektroden und Gesteinsproben verringert werden kann. Ergänzungsmessungen mit der SIP Fuchs und mit dem DEMS zeigen, dass die Messungen in bestimmten Grenzen mit

denen des Netzwerkanalysators verglichen werden können. Weiterhin scheint eine Messung der Dielektrizitätszahl mit dem Netzwerkanalysator im niedrigeren Frequenzbereich als bisher möglich.

### **Literatur:**

- [1] Meinke, H.H., 1965, Einführung in die Elektrotechnik höherer Frequenzen, Erster Band: Bauelemente und Stromkreise, Springer-Verlag, Berlin
- [2] Brockhaus 1959, - Taschenbuch der Geologie, VEB F.A. Brockhaus, Leipzig
- [3] Schön, J., 1983, Petrophysik, Enke Verlag Stuttgart
- [4] Patnode, H.W.; Wyllie M. R. J. 1950, The presence of conductive solids in reservoir rock as a factor in electric log interpretation. Trans. AIME 189 S.47 - 52
- [5] Winsauer. W.O.; McCardell, W.M., 1953, Ionic double layer conductivity in reservoir rocks. Trans. AIME 198, S.129 – 134
- [6] Bedienungsanleitung SIP-Fuchs, Radic-Research
- [7] Schonart, J., 1999, Messungen elektrischer Parameter an künstlichen und natürlichen Proben im Frequenzbereich von 1 MHz bis 1 GHz, Diplomarbeit, TU Clausthal
- [8] Kulenkampff, J., 1988, Untersuchungen über die komplexe elektrische Leitfähigkeit von porösen Gesteinen, Diplomarbeit, TU Clausthal
- [9] Wiesbeck, W., 1999, Grundlagen der Hochfrequenztechnik, Skriptum zur Vorlesung, Universität Karlsruhe
- [10] Kulenkampff, J., 1994, Die komplexe elektrische Leitfähigkeit poröser Gesteine im Frequenzbereich von 10 Hz bis 1 MHz - Einflüsse von Porenstruktur und Porenfüllung, Dissertation, TU Clausthal
- [11] Bedienungsanleitung Netzwerkanalysator ZVRE, Rohde und Schwarz
- [12] Weller, A.; Urban, C.; Schonart, J., Saturation and contamination dependence of electrical properties in the MHz range - 12th SAGEEP meeting, Oakland, California 1999
- [13] Urban, C.; Weller, A., Dielectric properties of sand-clay mixtures, 5th Meeting of Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section), Budapest, 1999
- [14] Zinke, O.; Brunswig, H., Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Band 1,2, Springer Verlag, Berlin, 1990

- Jörn Schünemann, Diplom Geophysiker, Institut für Geophysik, TU-Clausthal, Arnold-Sommerfeld Straße 1, 38678 Clausthal-Zellerfeld, (jetzt: Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Stilleweg 2, 30655 Hannover, E-Mail: [j.schuenemann@gga-hannover.de](mailto:j.schuenemann@gga-hannover.de))
- Prof. Dr. Andreas Weller, Institut für Geophysik, TU-Clausthal, Arnold-Sommerfeld Straße 1, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Tel: 05323/722233, E-Mail: [andreas.weller@tu-clausthal.de](mailto:andreas.weller@tu-clausthal.de)